近20 a塔里木河流域山区NDSI对气候变化的响应

张 音[1,2]， 孙从建[3]， 刘 庚[1,2]， 钞锦龙[1,2]， 耿甜伟[1,2]

（1. 太原师范学院地理科学学院，山西 晋中 030619；2. 太原师范学院汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室，山西 晋中 030619；3. 山西师范大学地理科学学院，山西 太原 030031）

摘 要：NDSI(归一化差异积雪指数)是一种评估地表积雪覆盖程度的指数，对研究山区积雪变化有重要作用。本研究基于2001—2022年遥感数据和再分析数据，采用趋势分析法、多元线性回归法等，分析了近20 a来塔里木河流域山区NDSI时空变化及其归因。结果表明：塔里木河流域山区2001—2022年NDSI均呈下降趋势，具有显著的空间异质性。北部和西部山区，NDSI值的季节变化相同，NDSI平均值从高到低为：冬季>春季>秋季>夏季，而南部山区的NDSI平均值夏季高于秋季。塔里木河流域山区年均实际蒸散发均呈上升趋势。北部山区的降水呈略微下降的趋势，而西部和南部山区表现为上升趋势。所有山区的饱和水汽压差均呈上升趋势。下行地表太阳辐射呈下降趋势。北部和西部山区的最低气温呈上升趋势，南部山区略呈下降趋势，而所有区域最高气温均呈上升趋势。众多变量中，气温和饱和水汽压对NDSI的影响较大。本研究可为政策决策提供科学依据。

关键词：塔里木河流域；积雪；气候变化；NDSI；多元线性回归

雪是冰冻圈的重要组成部分，是高海拔山区降水的主要来源[1]。积雪在地表能量平衡和水循环中发挥着重要的作用[2]。雪不仅是气候变化的敏感指标，而且对气候变化有反馈作用。近年来，温度升高导致积雪减少、加速了冰川和积雪的消融[3]，其中北半球积雪减少更为明显，春季积雪减少最为突出[4]。气候变暖可能会导致区域水文循环的改变，进而导致高山地区的积雪提前融化，夏季径流增加。因此，雪被认为是监测全球气候变化的重要指标之一[5]。

对于积雪的长期变化，在区域和全球尺度上都有很多研究[6-8]。已有研究证明了世界大部分区域的积雪变化呈减少趋势，并表明积雪变化存在明显的地区差异性[9-10]。例如，北半球春季积雪在过去90 a中显著减少，并且减少速度也在加快，主要是气温升高造成的[11]。对中国积雪研究发现，中国积雪变化的区域差异显著。中国南部和东北部的积雪日数(SCD)和积雪深度(SD)显著增加，而在新疆北部显著下降。近年来，全球地表温度呈上升趋势，并在高山地区表现最为明显，积雪面积、积雪日数都在减少[12]。降水和温度在积雪积累期和消融期起着重要的作用。研究发现，天山地区的积雪分布存在较大的时空异质性，并且气温是影响该区域积雪变化的主要因素[13]。随着温度的升高，降雪和积雪消融模式也发生了改变[14]。因此，为更好地了解积雪对气候变化的响应，开展相关研究有非常重要的意义。

塔里木河流域位于青藏高原西北部，远离海洋，是中国最大的内陆盆地，面积约占新疆总面积的64%，属于极端大陆性干旱气候，冰川融水是当地农业发展的重要水源[15-17]。该盆地也是对气候变化最敏感的地区之一。在全球变暖的背景下，塔里木盆地年均温以0.2 ℃·$(10a)^{-1}$的速度升高[18]。气候变化会影响积雪覆盖，进而影响春夏季河流径流，甚至导致洪涝灾害。因此，研究积雪变化对该地区的可持续发展具有重要意义。

目前，关于积雪的研究主要集中在新疆北部、东北地区以及青藏高原等积雪资源丰富的地区。塔里木河流域积雪的时空变化显著，但关于该流域

收稿日期：2024-04-18； **修订日期**：2024-06-06

基金项目：国家基础调查专项第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk010103)；科技创新领军人才项目(2022TSYCLJ0012)；山西省基础研究计划青年项目(202303021222222，202203021222243)

作者简介：张音(1995-)，女，博士，讲师，研究方向为水文水资源. E-mail: zhyin3621@163.com

通讯作者：孙从建. E-mail: suncongjian@sina.com

积雪变化及综合分析其影响因素的研究较少。塔里木河流域冰雪水文已经越来越受到人们的关注。本研究通过对近20 a来塔里木河流域积雪、气温、降水、太阳辐射、蒸散发和饱和水汽压等时间序列的数据进行分析,旨在阐明近20 a该流域积雪变化以及找出引起积雪变化的影响因素及其相互作用,并量化这些因素对积雪变化的贡献率,为流域未来水资源研究提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域位于中国新疆天山以南,深居亚欧大陆中部(34°~44°N,75°~92°E)。流域地形复杂,四周被高山环绕,形成封闭地形,流域面积约为92.60×10⁴ km²,海拔范围为772~8217 m。其中北部为天山山脉,西部为帕米尔高原,西南部为喀喇昆仑山脉,南部为昆仑山山脉,中部为塔里木盆地(图1)。

塔里木盆地为大陆性暖温带气候,全年干旱少雨,年平均降水量约为50 mm,而年潜在蒸散量可达2200 mm[19]。本研究基于海拔高度和气候条件,将研究区划分为4个区域:天山南坡(塔里木盆地北部)、昆仑山西部(塔里木盆地西部)、昆仑山东部(塔里木盆地南部)和塔里木盆地中部4个部分,其中塔里木盆地积雪较少,因此重点分析前3个区域,即塔里木河流域山区(海拔>1500 m)。

1.2 数据来源

1.2.1 *高程数据* DEM数据采用SRTMDEM 90 m,来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)。数据下载之后经拼接、裁剪之后,得到塔里木河流域的高程数据。

1.2.2 *积雪产品* 积雪数据采用来自MODIS的2001—2022年的MYD10A1产品,其空间分辨率为500 m(https://search.earthdata.nasa.gov)。数据下载之后进行格式和投影转换,并依据第二次冰川编目数据对积雪数据进行了掩膜处理,以去除冰川的影响。该数据集采用归一化差异积雪指数(NDSI)和其他标准测试的积雪映射算法生成。NDSI对于区分云、雪和冰非常有效,是表征积雪的一个重要指标。其计算公式为:

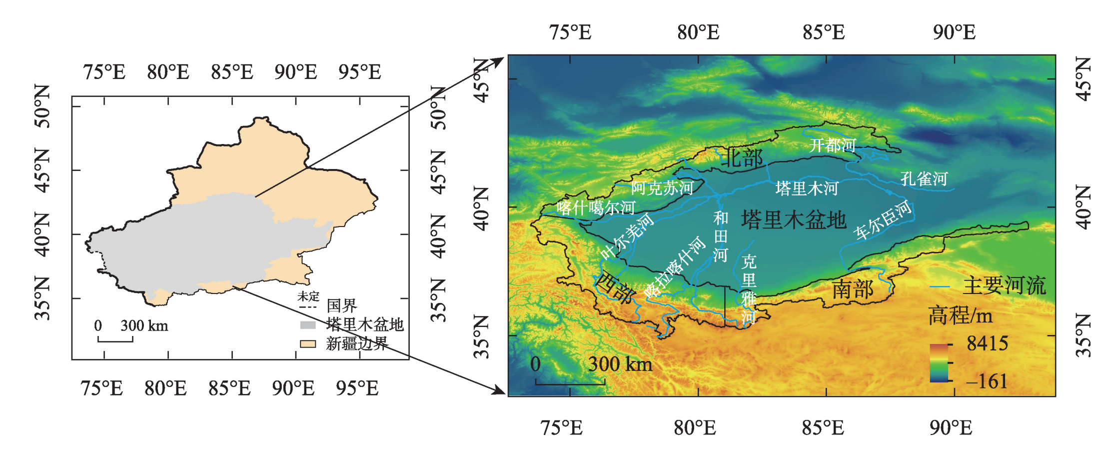
$$\mathrm{NDSI}=\frac{Green-SWIR}{Green+SWIR} \tag{1}$$

式中:*Green*和*SWIR*分别为绿色和短波红外波段的反射率。当NDSI>0.40时,表示积雪[20]。

1.2.3 *气象再分析数据* 气象数据采用的是TerraClimate数据集,是一个全球陆地表面月度气候和气候水平衡的数据集,它涵盖了1958—2022年间的数据,具有每月时间分辨率和4 km(1/24°)的空间分辨率,为需要高空间分辨率和时变数据的全球尺度的生态和水文研究提供了重要输入[21-22]。TerraClimate数据集提供了多种气候变量,本研究采用实际蒸散量(AET)、降水量(PRE)、饱和水汽压(VPD)、太阳辐射量(SRAD)、最高(TMMX)和最低温度(TMMN)等6种变量分析积雪对气候变化的响应(https://www.ecmwf.int)。

1.3 研究方法

1.3.1 *趋势分析法* 采用一元线性回归分析方法对2001—2022年塔里木河流域山区积雪动态变化进



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2023)2767号,对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况图

Fig. 1 The location of study area

行趋势分析,单个像元多年回归方程中趋势线斜率即为年际变化率。其计算公式为:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(i \times snow) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} snow}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{2}$$

式中:n表示时间序列的长度;i表示第i年;$snow$表示积雪像元个数。$Slope > 0$,表示NDSI随时间变化呈上升趋势,反之呈下降趋势。

1.3.2　多元线性回归法　多元线性回归是一种多变量回归方法,用于研究一个因变量与多个自变量之间的关系。本研究使用多元线性回归方法将反映积雪变化的NDSI值与多个气候因子联系起来,用以判定各个要素对流域NDSI变化的贡献率,并进行归因分析。其计算公式为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \varepsilon \tag{3}$$

式中:β_0表示截距;$\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$表示回归系数;$\varepsilon$表示误差项。

2　结果与分析

2.1　塔里木河流域山区NDSI时空分布特征

图2显示了2001—2022年流域山区NDSI的时空分布及其变化趋势,具有较强的空间分布规律。由图2a可知,塔里木盆地NDSI值的范围是−0.22~0.70,其中北部积雪主要分布在该子区域的北边,面积约占该区域的59.83%,西部主要分布在西边和南边,面积约占该区域的55.84%,南部大部分区域分布有积雪,面积约占该区域的52.14%。由图2b可知,北部的东北部NDSI值呈增长趋势,而在中部、西部地区呈下降趋势;西部的南边大部分区域NDSI值呈增长趋势,而在西边整体表现为减少趋势;南部的中间部分区域NDSI值呈增长趋势,其余地区表现为下降趋势。从图2c~图2e来看,整体上3个子区域多年NDSI呈下降趋势的斜率($Slope$<0),其中北部下降速度最快,其次是西部,南部地区下降速度最慢。

由上述结果可知,积雪面积随海拔升高而增加。北边积雪面积占比最大,南边最小,主要是随着纬度的增加,温度降低,从雪线角度来看,纬度越高,雪线越低[23]。近20 a来,3个子区域的积雪面积均呈下降趋势,主要由于全球变暖,气温升高加速了积雪消融[24]。积雪的空间趋势变化与降水密切相关,可能是降水的增加导致了积雪的增加,而降水变化可能受VPD影响[25]。

研究区NDSI季节变化也表现出较明显的空间差异(图3)。在北部春季、夏季、秋季NDSI均值分

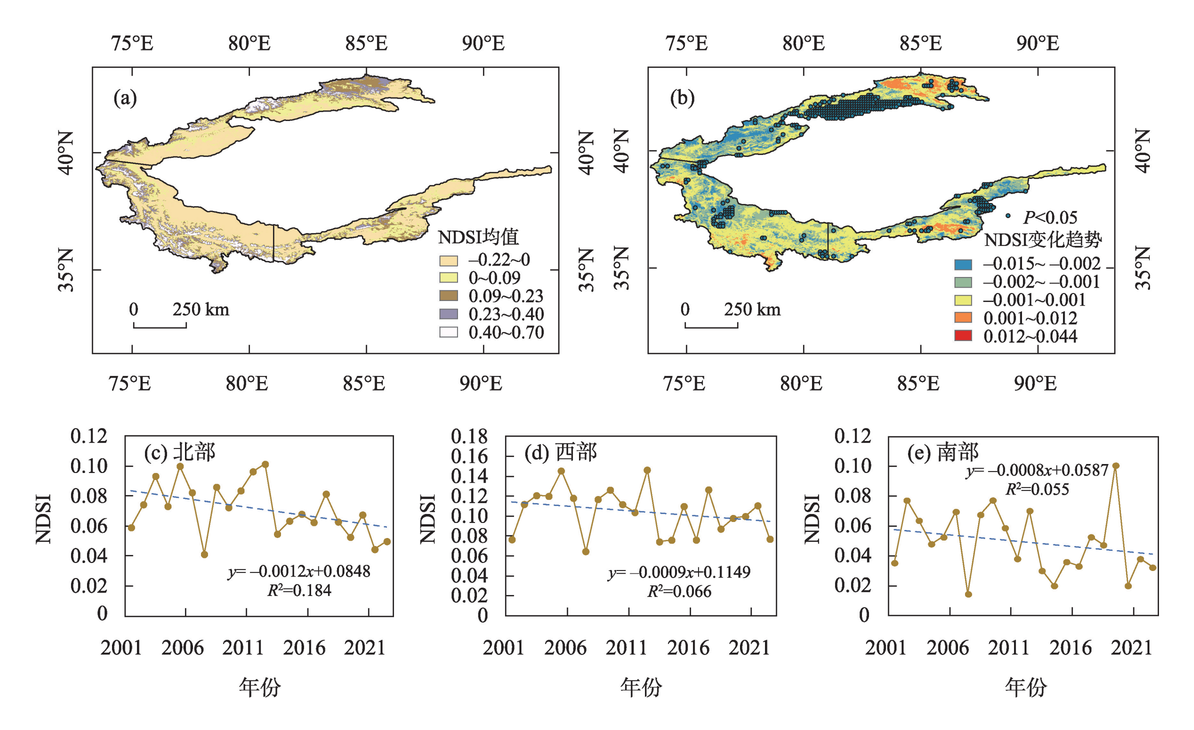


图2　2001—2022年流域山区(>1500 m)NDSI的时空变化(a、c~e)及其变化趋势(b)

Fig. 2　Spatiotemporal distribution (a, c-e) and trend changes (b) of NDSI in mountainous areas of the basin (>1500 m) from 2001 to 2022

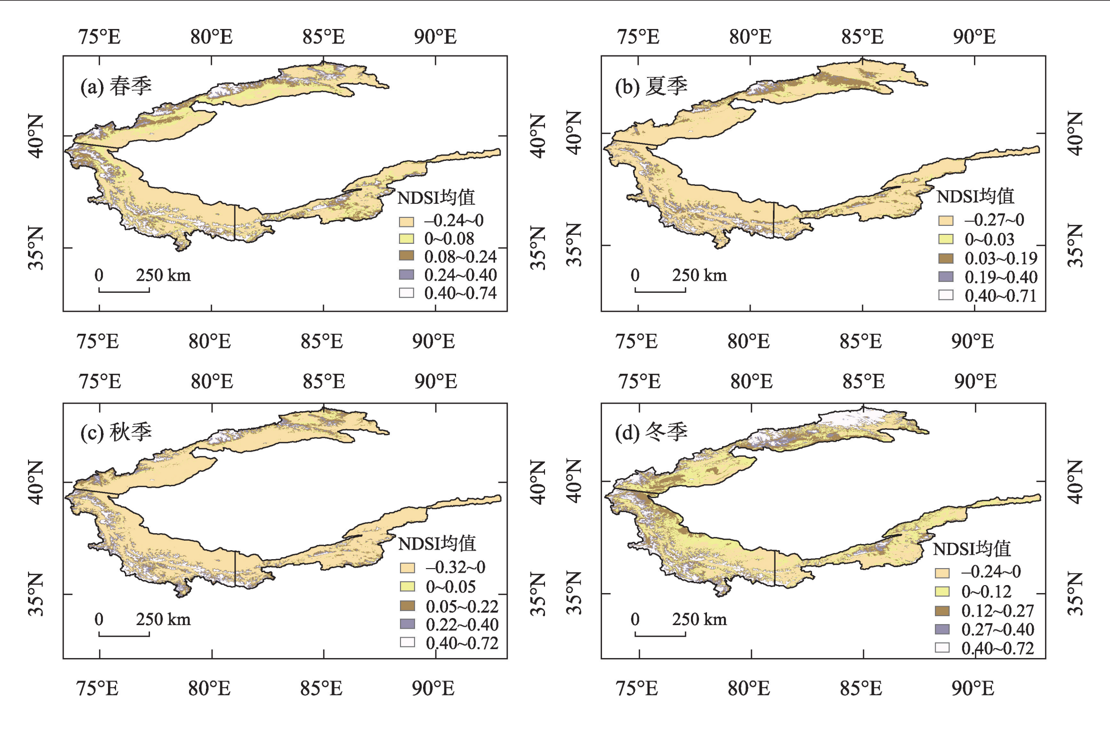


图3 2001—2022年流域NDSI的季节空间变化

Fig. 3 Seasonal spatial variation of NDSI in the basin from 2001 to 2022

别为0.59、0.34和0.35，冬季最大为0.86（图4）。夏季积雪从北部的西边和南边开始消融，NDSI降到最低，秋季随着气温的下降，降水增多，到冬季NDSI达到最高，NDSI均值表现为：冬季>春季>秋季>夏季。在西部春季、夏季、秋季和冬季NDSI均值分别为0.55、0.38、0.45和0.80，NDSI值的季节变化与北部相同，均表现为：冬季>春季>秋季>夏季（图4），但在西部春季NDSI保持较高的水平，与冬季几乎持平，主要是因为中高纬度地区冬春季漫长，气温回升较慢[26]，加上秋冬季遗留积雪，导致春季NDSI值较高。在南部四季NDSI均值依次为：0.50、0.30、0.26和0.57，NDSI均值冬季>春季>夏季>秋季（图4）。其中夏季NDSI值高于秋季，主要是因为中高纬度山区夏季温度低，降雪较多[27]。加上秋季大风日数多，所以积雪面积也受到一定的影响[28]。

2.2 塔里木河流域山区NDSI的影响因子分析

本研究选取与NDSI相关的6种气候因子（AET、PRE、VPD、SRAD、TMMN、TMMX），并将其分为两类：与水分相关的要素（图5~图6）和与气温相关的要素进行深入分析（图7~图8）。

图5~图6是与水分相关的3种要素（AET、PRE、VPD）。由图5可知，近20 a来，盆地的AET值在0~337.50 mm之间，其中北部AET表现为北高南低，东高西低；西部西北区域AET较高，中部和东部区域

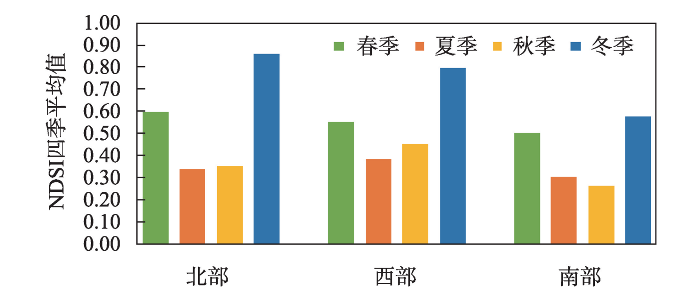


图4 2001—2022年流域NDSI的四季平均值

Fig. 4 Seasonal mean of NDSI in the basin from 2001 to 2022

较低；南部AET中部高两边低。分析近20 a来AET的趋势变化发现，北部东边、西部西北边和南部中间区域AET呈增加趋势，而其余地区AET基本呈下降趋势。总体上，3个子区域的AET均呈上升趋势（*Slope*>0），且南部上升速度最快，其次是西部，北部上升速度较慢（图6）。分析NDSI与AET之间相互关系可知，虽然积雪面积大，会增加反射，但是在积雪消融过程中，土壤水分增加，导致蒸散发提高[29]。

关于PRE（图5），盆地PRE在11.55~550.55 mm之间，其空间分布与AET相似，表现为北部东北边、西部西北边和南部中南部分PRE较高，其余地方PRE较低。北部东北边、西部南边和南部中间区域PRE 20 a来呈上升趋势，其他地方PRE呈下降趋势。总体上，近20 a来北部PRE略微下降（*Slope*<

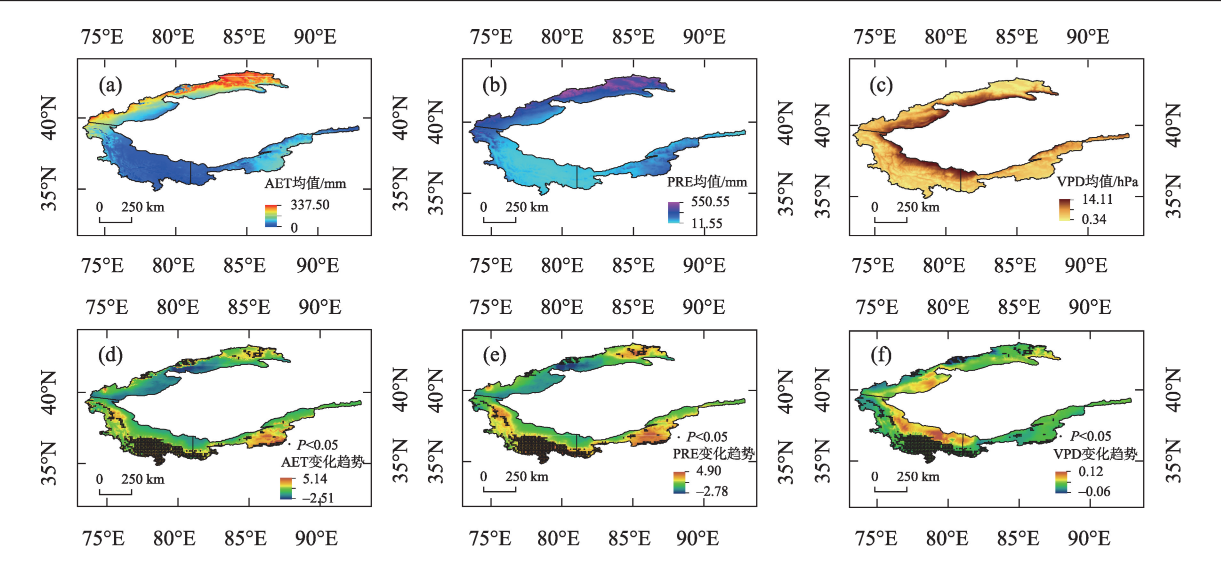


图5　2001—2022年流域AET、PRE和VPD的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of AET, PRE, and VPD in the basin from 2001 to 2022

图6　2001—2022年流域AET、PRE和VPD的变化趋势

Fig. 6　Trend changes of AET, PRE, and VPD in the basin from 2001 to 2022

0),西部和南部上升(*Slope*>0)(图6)。虽然,降水与积雪的空间变化具有一致性,但在多年年均值序列中,西部和南部NDSI与PRE趋势相反,可能是由于二者属性差异造成,降水量包括降雪和降雨等,而积雪分为永久性和季节性积雪。

VPD能反映空气中水汽含量和湿度。气温的升高,VPD也会增加,当空气中水汽压达到饱和时,水汽就会凝结形成降雨,间接影响积雪变化[30]。表现为北部南边、西部北边和南部西北边VPD较高,其余地方VPD较低(图5)。整体上VPD在0.34~14.11之间。VPD的趋势变化表现为北部西南边、西部北边和南部西北边为上升趋势,而其余地方呈下降趋势。总体上,3个子区域的VPD均呈上升趋势(*Slope*>0),其中西部上升速度较快(图6)。

图7~图8是与气温相关的3种要素(SRAD、TMMN、TMMX)。由图7可知,塔里木盆地的SRAD值在1845.25~2369.69 W之间,其中北部SRAD南高北低,西部SRAD在空间上表现为北高南低,南部表现为中部低,东部和西北部较高。总体上,近20 a来SRAD值呈下降趋势(*Slope*<0)(图8)。积雪能够反射太阳光,从而降低了地面接收的太阳辐射。

关于TMMN和TMMX研究发现,盆地的TMMN值在−28.24~8.33 ℃之间,TMMX在−19.21~20.93 ℃之间。北部空间上表现为南高北低,并且20 a来东北部的TMMN和TMMX呈上升趋势,其余大部分区域呈下降趋势。西部空间上表现为北高南低。近20 a来TMMN趋势变化表现为中部、南部大部分区域呈上升趋势,西北部表现为下降趋势。TMMX的趋势变化表现为中部呈上升趋势,而东部和西北部表现为下降趋势。南部空间上表现为北高南低,且西部大部分区域呈上升趋势,其余部分呈下降趋势。总体来看,近20 a来北部和西部的TMMN值呈上升趋势(*Slope*>0),南部的TMMN值略微下降(*Slope*<0),而3个子区域的TMMX均呈上升趋势(*Slope*>0)(图8)。除了南部山区TMMN外,其余地区最低温和最高温的年均值序列均呈上升趋势,加速了季节性积雪的融化(图3、图7和图8)。

2.3 塔里木河流域山区NDSI变化的气候归因

在全球气候变暖的背景下,积雪加速融化,导致融雪型洪水等极端水文事件的频繁发生[31]。塔里木河流域是典型的干旱区,但周围山区积雪较多,其NDSI值受制于气温、降水、蒸散发、太阳辐射等众多气候因子及其他要素,对气候变化的响应非常敏感。

本研究重点研究了各气候因子对NDSI变化的影响程度(表1)。结果表明,在塔里木盆地北部,各个要素的影响程度依次为:VPD>TMMN>TMMX>PRE>SRAD>AET,在西部,各个要素的影响程度依次为:TMMN>TMMX>SRAD>VPD>PRE>AET,在南部,各个要素的影响程度依次为:TMMN>TMMX>SRAD>VPD>AET>PRE。分季节来看,春季各个要素对NDSI变化的影响程度依次为:TMMX>SRAD>TMMN>AET=VPD>PRE(北部)、TMMN>VPD>TMMX>SRAD>PRE>AET(西部)、TMMX>TMMN>VPD>

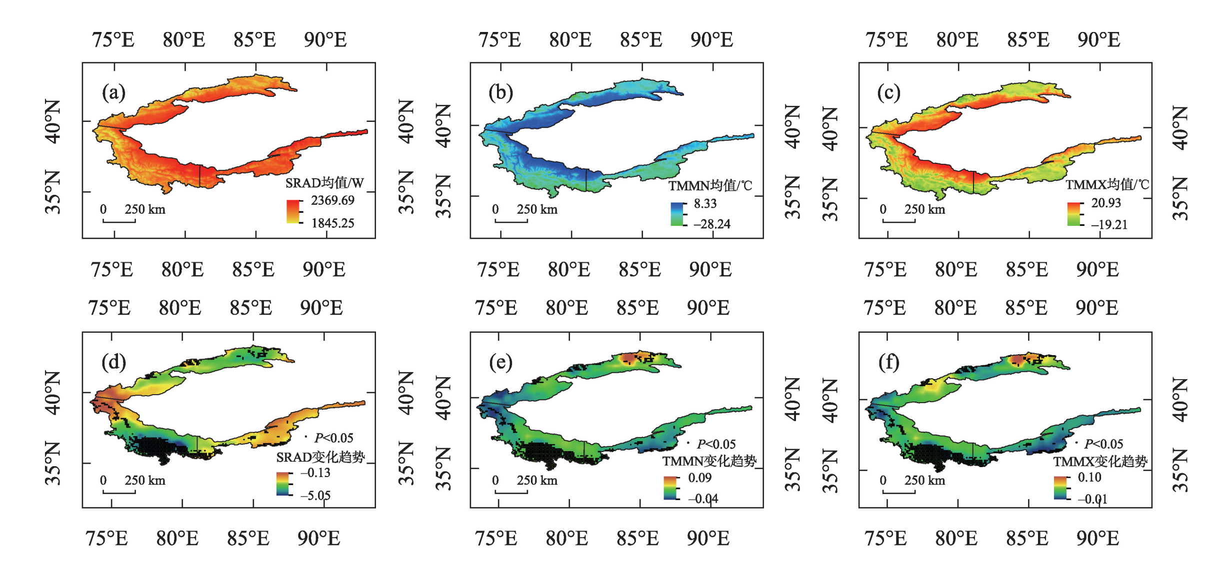


图7 2001—2022年流域SRAD、TMMN、TMMX的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of SRAD, TMMN, and TMMX in the basin from 2001 to 2022

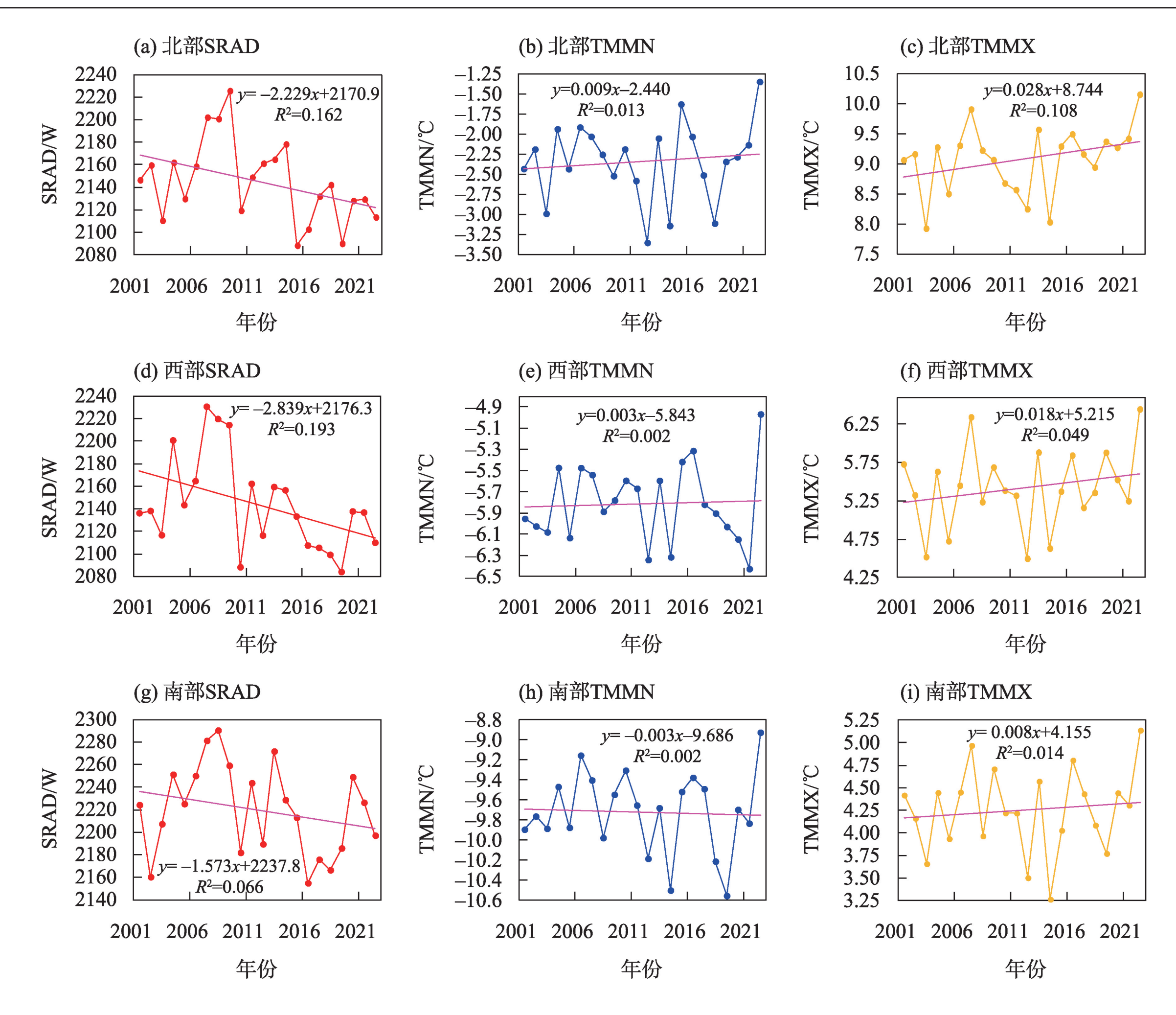


图8　2001—2022年流域SRAD、TMMN、TMMX的变化趋势

Fig. 8　Trend changes of SRAD, TMMN, and TMMX in the basin from 2001 to 2022

表1　NDSI与各变量之间的回归系数

Tab. 1　Regression coefficients between NDSI and various variables

		β_1(AET)	β_2(PRE)	β_3(VPD)	β_4(SRAD)	β_5(TMMN)	β_6(TMMX)
北部	年均值	−0.13*	0.48*	0.89*	−0.18*	−0.60*	−0.53*
	春季	−0.16*	−0.15*	−0.16*	0.40*	0.26*	−0.53*
	夏季	−0.19*	0.54*	−0.37*	−0.86*	−1.94*	3.48*
	秋季	−0.24*	−0.11*	−1.09*	−0.37*	−0.64*	1.95*
	冬季	0.16*	−0.34*	−0.65*	−0.14*	−0.01	0.33*
西部	年均值	−0.10*	0.12*	0.81*	−0.88*	−1.89*	1.08*
	春季	0.20*	0.32*	0.48*	0.44*	−1.22*	0.45*
	夏季	0.14*	−0.02	0.84*	−0.37*	−1.73*	1.17*
	秋季	0.24*	0.20*	0.73*	0.47*	−0.82*	−0.29
	冬季	0.00	0.18*	0.51*	−0.38*	−2.63*	2.39*
南部	年均值	−0.32*	0.21*	0.84*	−0.92*	−2.32*	1.68*
	春季	0.32*	−0.06*	0.67*	0.01	2.89*	−3.85*
	夏季	−0.14*	−0.02	0.54*	−0.32*	1.13*	−1.60*
	秋季	0.12*	−0.13*	0.98*	0.05*	1.93*	−3.15*
	冬季	0.09*	−0.01	−0.19*	−0.03	0.11	0.01

注：*表示 $P<0.05$ 水平下显著。正负表示正负驱动。

AET>PRE>SRAD(南部);夏季为TMMX>TMMN>SRAD>PRE>VPD>AET(北部)、TMMN>TMMX>VPD>SRAD>AET>PRE(西部)、TMMX>TMMN>VPD>SRAD>AET>PRE(南部);秋季为TMMX>VPD>TMMN>SRAD>AET>PRE(北部)、TMMN>VPD>SRAD>TMMX>AET>PRE(西部)、TMMX>TMMN>VPD>PRE>AET>SRAD(南部);冬季为VPD>PRE>TMMX>AET>SRAD>TMMN(北部)、TMMN>TMMX>VPD>SRAD>PRE>AET(西部)、VPD>TMMN>AET>SRAD>TMMX=PRE(南部)。

研究发现,在众多气候因子中,TMMN、TMMX对NDSI值的影响程度较高,气温升高(TMMX)会直接影响积雪的消融,导致NDSI值降低,而气温降低(TMMN)会使积雪凝聚,抑制积雪的消融[32]。分季节看也是如此,春季、夏季、秋季NDSI受气温影响较大,气温升高,积雪下降明显。而冬季受饱和水汽压影响较大,VPD是反映空气中水汽含量和湿度的指标,会间接影响积雪的变化。然而,积雪也会对气候因子有一定的影响。积雪面积大,会增加反射,但是在积雪消融过程中,土壤水分增加,导致蒸散发提高。积雪能够反射太阳光,从而降低了地面接收的太阳辐射。

由此可见,积雪作为地球表面能量平衡和水循环的重要组成部分,其变化对全球气候和局地气候具有显著影响,而气候变化也会反过来影响积雪的分布和特性。这种相互影响使得积雪与气候因子之间的关系变得复杂,气候变化可以通过改变温度、降水等气象要素来影响积雪的形成、分布和消融,还会影响降水的形式和强度,从而改变积雪的特性和分布。另外,积雪对气候也有反作用。积雪通过反射太阳辐射和改变地表能量平衡来影响气候,还可以通过改变地表粗糙度和水文循环过程来影响气候。因此,二者的关系是复杂的,深入研究这种关系对于更好地理解气候变化和制定应对策略具有重要意义。

3 结论与展望

本研究通过对塔里木河流域山区2001—2022年的NDSI时空变化以及气候因子变化特征研究,并对NDSI时空变化进行了气候归因。主要结论如下:

(1) 塔里木河流域山区2001—2022年NDSI均呈下降趋势,具有显著的空间异质性。NDSI四季变化表现为:在北部和西部,NDSI值的季节变化相同,NDSI平均值从高到低为:冬季、春季、秋季和夏季。在南部,NDSI平均值从高到低为:冬季、春季、夏季和秋季。

(2) 塔里木河流域山区年均AET均呈上升趋势,且南部的上升速度最快,其次是西部,北部的上升速度较慢。近20 a来,北部的PRE值呈略微下降的趋势,西部和南部均表现为上升趋势。区域VPD值均呈上升趋势,其中西部的上升速率较高。区域SRAD值呈下降趋势。北部和西部的TMMN值呈上升趋势,南部的TMMN值略微下降,而区域TMMX均呈上升趋势。

(3) 在北部,各个要素对NDSI的影响程度依次为:VPD>TMMN>TMMX>PRE>SRAD>AET,西部各变量的排序依次为:TMMN>TMMX>SRAD>VPD>PRE>AET,南部各变量的排序依次为:TMMN>TMMX>SRAD>VPD>AET>PRE。分季节来看,春季、夏季、秋季NDSI受气温影响较大,气温升高,积雪下降明显。而冬季受饱和水汽压影响较大,VPD会间接影响积雪的变化。

本研究分析了多种气候因子对NDSI的影响,但NDSI的变化实际上是多种气候因子综合作用的结果。PRE增加在一段时间内可能提高NDSI值,但如果AET高,积雪的含水量可能会降低,NDSI值也会随之下降。高VPD、强SRAD和高温可能共同促进积雪的融化和升华,导致NDSI值显著下降;反之,低VPD、弱SRAD和低温可能有助于积雪的保持和积累,提高NDSI值。此外,这些气候因子的变化是动态的、非线性的,受到多种因素的影响。因此,在未来的研究中,需要继续探索这些气候因子的变化规律,有助于更全面地了解气候变化对雪覆盖的影响,并为应对气候变化提供更为有效的策略。

参考文献(References):

[1] 康世昌, 郭万钦, 钟歆玥, 等. 全球山地冰冻圈变化、影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 143-152. [Kang Shichang, Guo Wanqin, Zhong Xinyue, et al. Changes in the mountain cryosphere and their impacts and adaptation measures[J]. Climate Change Research, 2020, 16(2): 143-152.]

[2] 肖雄新, 张廷军. 基于被动微波遥感的积雪深度和雪水当量反演研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, 33(6): 590-605. [Xiao Xiongxin, Zhang Tingjun. Passive microwave remote sensing of snow depth and snow water equivalent: Overview[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(6): 590-605.]

[3] 孙成杰, 王剑庚, 张永宏, 等. 2002—2021年北半球中高纬度典型山脉积雪的时空变化对比分析[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2): 475-488. [Sun Chengjie, Wang Jiangeng, Zhang Yonghong, et al. Spatiotemporal variations and comparative analysis of snow cover at typical mid to high latitudes mountain ranges in the Northern Hemisphere from 2002 to 2021[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(2): 475-488.]

[4] 效存德, 杨佼, 张通, 等. 冰冻圈变化的可预测性、不可逆性和深度不确定性[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(1): 1-11. [Xiao Cunde, Yang Jiao, Zhang Tong, et al. The predictability, irreversibility and deep uncertainty of cryospheric change[J]. Climate Change Research, 2022, 18(1): 1-11.]

[5] 王建, 车涛, 李震, 等. 中国积雪特性及分布调查[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 12-26. [Wang Jian, Che Tao, Li Zhen, et al. Investigation on snow characteristics and their distribution in China [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 12-26.]

[6] 曹晓云, 肖建设, 郝晓华, 等. 2001—2020年三江源地区积雪日数变化及地形分异[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1370-1380. [Cao Xiaoyun, Xiao Jianshe, Hao Xiaohua, et al. Variation of snow cover days and topographic differentiation in Sanjiangyuan area from 2001 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1370-1380.]

[7] 李虹, 李忠勤, 陈普晨, 等. 近20 a新疆阿尔泰山积雪时空变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1040-1051. [Li Hong, Li Zhongqin, Chen Puchen, et al. Spatio-temporal variation of snow cover in Altai Mountains of Xinjiang in recent 20 years and its influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1040-1051.]

[8] Notarnicola C. Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000-2018[J]. Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal, 2020, 243: 111781.

[9] 黄晓东, 马英, 李雨馨, 等. 1980—2020年青藏高原积雪时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2023, 45(2): 423-434. [Huang Xiaodong, Ma Ying, Li Yuxin, et al. Spatiotemporal variation characteristics of snow cover over the Tibetan Plateau from 1980 to 2020[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(2): 423-434.]

[10] 钟鼎杰, 孙梦鑫, 张岳, 等. 2001—2020年川西高原积雪时空变化及影响因素分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 111-118. [Zhong Dingjie, Sun Mengxin, Zhang Yue, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of snow cover in West Sichuan plateau from 2001 to 2020[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(11): 111-118.]

[11] Brown R D, Robinson D A. Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922- 2010 including an assessment of uncertainty[J]. Cryosphere, 2011, 5(1): 219-229.

[12] Mudryk L R, Kushner P J, Derksen C, et al. Snow cover response to temperature in observational and climate model ensembles[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44: 919-926.

[13] 秦艳, 丁建丽, 赵求东, 等. 2001—2015年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 249-260. [Qin Yan, Ding Jianli, Zhao Qiudong, et al. Spatial-temporal variation of snow cover in the Tianshan Mountains from 2001 to 2015, and its relation to temperature and precipitation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018 40(2): 249-260.]

[14] Moghadas S, Leonhardt G, Marsalek J, et al. Modeling urban runoff from Rain-on-Snow events with the US EPA SWMM model for current and future climate scenarios[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2018, 32(1): 04017021.

[15] 张齐飞, 陈亚宁, 孙从建, 等. 塔里木河流域水储量变化及绿洲生态安全评估[J]. 干旱区地理, 2024, 47(1): 1-14. [Zhang Qifei, Chen Yaning, Sun Congjian, et al. Changes in terrestrial water storage and evaluation of oasis ecological security in the Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(1): 1-14.]

[16] 王诗语, 孙从建, 陈伟, 等. 基于水化学及径流组成的中国西北内陆河流域水资源风险评估[J]. 地理学报, 2023, 78(11): 2763-2780. [Wang Shiyu, Sun Congjian, Chen Wei, et al. Assessing water resource risks in inland river basins of Northwest China from water chemistry and runoff[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78 (11): 2763-2780.]

[17] 孙从建, 陈伟, 王诗语. 气候变化下的塔里木盆地西南部内陆河流域径流组分特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 113-122. [Sun Congjian, Chen Wei, Wang Shiyu. Stream component characteristics of the inland river basin of the Tarim Basin under regional climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 113-122.]

[18] Zhang J, Jia L, Menenti M, et al. Glacier area and snow cover changes in the range system surrounding Tarim from 2000 to 2020 using Google Earth Engine[J]. Remote Sensing, 2021, 13(24): 5117.

[19] Patrick K, Markus D, Ümüt H. Effects of land use and climate change on groundwater and ecosystems at the middle reaches of the Tarim River using the MIKE SHE integrated hydrological model[J]. Water, 2015, 7(6): 3040-3056.

[20] 梁天刚, 高新华, 黄晓东, 等. 新疆北部MODIS积雪制图算法的分类精度[J]. 干旱区研究, 2007, 24(4): 446-452. [Liang Tiangang, Gao Xinhua, Huang Xiaodong, et al. Study on the accuracy of MODIS snow cover Mapping algorithm in northern Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(4): 446-452.]

[21] 肖潇, 邱新法, 徐金勤. 基于TerraClimate数据集的1960—2019年中国干湿气候变化特征[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 27-33, 43. [Xiao Xiao, Qiu Xinfa, Xu Jinqin. Characteristics of dry and wet climate change in China from 1960 to 2019 based on TerraClimate dataset[J]. Journal of Changjian. River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 27-33, 43.]

[22] Xue J, Wang Y Y, Teng H F, et al. Dynamics of vegetation greenness and its response to climate change in Xinjiang over the past two decades[J]. Remote Sensing, 2021, 13(20): 4063.

[23] Hammond J C, Saavedra F A, Kampf S K. Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001-2016[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(12): 4369-4383.

[24] 穆振侠, 姜卉芳. 新疆阿克苏河流域昆马力克河积雪消融规律对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1284-1292. [Mu Zhenxia, Jiang Huifang. The response of snow cover ablation to climate change in the Kumalik river basin, southern Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1284-1292.]

[25] Novick K A, Ficklin D L. Historic and projected changes in vapor pressure deficit suggest a continental-scale drying of the United States atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2017, 122(4): 2061−2079.

[26] Lu C H, Xie S Q, Qin Y J, et al. Recent intensified winter coldness in the mid-high latitudes of Eurasia and its relationship with daily extreme low temperature variability[J]. Advances in Meteorology, 2016, 2016: 1−11.

[27] Zhang X T, Li X M, Li L H, et al. Environmental factors influencing snowfall and snowfall prediction in the Tianshan Mountains, Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(1): 15−28.

[28] Dadic R, Mott R, Lehning M, et al. Wind influence on snow depth distribution and accumulation over glaciers[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2010, 115: F01012.

[29] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2994−3008. [Deng Xinyao, Liu Yang, Liu Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994−3008.]

[30] Fu Q, Hou R J, Li T X, et al. The functions of soil water and heat transfer to the environment and associated response mechanisms under different snow cover conditions[J]. Geoderma, 2018, 325: 9−17.

[31] Zhang Y, Gulimire H, Sulitan D, et al. Monitoring and analysis of snow cover change in an alpine mountainous area in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(9): 962−977.

[32] 尤元红, 甘宏泽, 侯金亮, 等. 基于MODIS数据的2002—2020年北疆积雪时空变化研究[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(3): 718−726. [You Yuanhong, Gan Hongze, Hou Jinliang, et al. A study of the spatio-temporal changes in snow cover in Northern Xinjiang from 2002 to 2020 based on MODIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(3): 718−726.]

Response of NDSI in the Tarim River Basin mountainous areas to climate change over the past 20 years

ZHANG Yin[1,2], SUN Congjian[3], LIU Geng[1,2], CHAO Jinlong[1,2], GENG Tianwei[1,2]

(1. School of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology Security in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 3. College of Geography, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract: NDSI is used to evaluate the degree of surface snow cover, which plays a vital role in exploring snow cover changes in mountainous areas. In this study, remote sensing data and reanalysis data from 2001 to 2022, trend analysis, and multiple linear regression were used to analyze the spatiotemporal changes and attribution of NDSI in the mountainous areas of the Tarim River Basin over the past 20 years. Results indicated a downward trend of NDSI in the mountainous areas of the Tarim River Basin from 2001 to 2022, with significant spatial heterogeneity. The seasonal variation of NDSI was similar in the northern and western mountainous areas, with the average NDSI ranking from high to low in winter>spring>autumn>summer. However, the average NDSI in the southern mountainous areas was higher in summer than in autumn. The average annual actual evapotranspiration in the mountainous areas of the Tarim River Basin showed an increasing trend. Precipitation in the northern mountainous areas exhibited a slight downward trend, whereas that in the western and southern mountainous areas showed an upward trend. The difference in saturated water vapor pressure showed an upward trend in all mountainous areas. The downward surface solar radiation exhibited a decreasing trend. The minimum temperature in the northern and western mountainous areas showed an increasing trend, whereas that in the southern mountainous areas showed a slightly decreasing trend. The maximum temperature in all regions exhibited an upward trend. Among these variables, temperature and saturated water vapor pressure exerted a significant impact on NDSI. This study can provide a scientific basis for policy decision-making.

Keywords: Tarim River Basin; snow cover; climate change; NDSI; multiple linear regression